

Comparação entre tempos de reverberação calculados e medidos

Comparison between calculated and measured reverberation times

Paulo Henrique Trombetta Zannin
Andressa Maria Coelho Ferreira
Daniele Petri Zwirtes
Elenise Nunes
Silvana Bastos Stumm
Martin Töws

Paulo Henrique Trombetta
Zannin
Departamento de Engenharia
Mecânica
Universidade Federal do Paraná
Rua Benedito Berillo
Fangueiro, n. 108
Jardim Santa Bárbara
Curitiba - PR - Brasil
CEP: 81540-420
E-mail: zannin@demec.ufpr.br

Andressa Maria Coelho
Ferreira
Departamento de Engenharia
Mecânica
Universidade Federal do Paraná
E-mail:
arqferreira@yahoo.com.br

Daniele Petry Zwirtes
Departamento de Engenharia
Mecânica
Universidade Federal do Paraná

Elenise Nunes
Departamento de Engenharia
Mecânica
Universidade Federal do Paraná

Silvana Bastos Stumm
Departamento de Engenharia
Mecânica
Universidade Federal do Paraná

Martin Töws
Departamento de Engenharia
Mecânica
Universidade Federal do Paraná

Recebido em 17/12/04
Aceito em 18/06/05

Resumo

A qualidade das atividades educacionais depende fortemente das condições acústicas das salas de aula. Este artigo apresenta uma avaliação de dois métodos teóricos de cálculo para o Tempo de Reverberação (TR) em salas de aula, fundamentados na fórmula de Sabine e de Hohmann, Setzer e Wehling. Como objeto de estudo foram utilizadas salas de aula da Universidade Federal do Paraná (UFPR), localizadas no Campus III, Setor de Tecnologia, Bloco IV, situadas na cidade de Curitiba, Brasil. Para corroborar os valores encontrados com a aplicação das fórmulas, foram realizadas medições de TR in situ. Os resultados obtidos mostram a Equação de Sabine Modificada (Método Indireto) como a mais indicada, por se aproximar dos valores de tempos de reverberação experimentais.

Palavras-chave: acústica, conforto acústico, tempo de reverberação, salas de aula.

Abstract

The quality of educational activities strongly depends of the acoustic conditions of classrooms. This article presents an evaluation of two theoretical methods of calculation of the Reverberation Time (RT) in classrooms, based on the formula of Sabine and Hohmann, Setzer and Wehling. This study was carried out in classrooms of the Federal University of the Paraná (UFPR), located in Campus III, Sector of Technology, Block IV, located in the city of Curitiba, Brazil. RT measurements have been made in situ, aiming to corroborate the results obtained from the application of formula. The results indicate that the modified formulae of Sabine (Indirect Method) is the most suitable one, since the calculated value are the closest ones to the measured reverberation values.

Keywords: acoustics, acoustic comfort, reverberation time, classrooms

Introdução

A comunicação verbal é reconhecida como requisito fundamental em qualquer sociedade humana. A interferência na comunicação oral perturba atividades profissionais, educacionais, domésticas, e cria um ambiente desfavorável ao convívio e ao desempenho educacional e profissional (SILVA, 2000).

Pesquisas têm apresentado a influência da acústica no aprendizado e desempenho de alunos, como também no comportamento social e na compreensão da fala. Condições acústicas desfavoráveis tornam o aprendizado e o ensino desnecessariamente exaustivos (HAGEN et al., 2002). Excesso de ruído e reverberação em uma sala de aula dificulta a comunicação, o que gera uma barreira ao aprendizado (LUBMAN; SUTHERLAND, 2003).

De acordo com Hodgson (2003), o tempo de reverberação adequado contribui para um melhor aprendizado nas salas de aula, contudo esse parâmetro do ambiente tem sido freqüentemente negligenciado. O tema é de tamanha importância que, inclusive, a World Health Organization (2000) apresenta recomendações para o tempo de reverberação (TR) em salas de aula. O valor recomendado é de 0,6 a fim de se ter um ambiente adequado à aprendizagem.

O TR pode ser obtido através de equações matemáticas e através de medições com instrumentação adequada. A equação mais difundida para o cálculo do TR foi desenvolvida pelo grande pioneiro da moderna acústica de salas, o físico norte-americano Wallace Clement Sabine. A Equação de Sabine, como ficou conhecida, leva em consideração o volume da sala e os materiais de revestimento das paredes com seus respectivos coeficientes de absorção sonora. Enquanto países como Estados Unidos da América, Inglaterra, Alemanha, Itália e Portugal possuem legislação indicando os valores adequados para TR em salas de aula, o mesmo não ocorre no Brasil (ZANNIN et al., 2004).

Estudos realizados por Bistafa e Bradley (2000), Neubauer (2001) e Bradley (2002) mostram que as diversas fórmulas de TR por eles analisadas não apresentam grande precisão nos resultados, pois são apenas aproximações do modelo real. Cabe ressaltar que essas equações não levam em consideração parâmetros como absorção pelo ar e a existência de objetos como mesas, cadeiras, pranchetas, entre outros. Contudo, a formulação proposta por Hohmann, Setzer e Wehling (2004), baseada na fórmula de Sabine, considera a

contribuição dos elementos relativos à funcionalidade do ambiente (pessoas, móveis, etc.) no cômputo do coeficiente de absorção sonora deste. Nessa formulação é considerada também a influência da absorção sonora devida ao ar.

No presente trabalho, o tempo de reverberação foi calculado para diferentes modelos de salas de aula, utilizando a Equação de Sabine, no artigo denominado de Método Direto e a Equação de Sabine Modificada, segundo formulação de Hohmann, Setzer e Wehling, denominada de Método Indireto. Levantaram-se, também, dados experimentais das salas de aula em análise mediante a medição do tempo de reverberação, possibilitando, assim, a comparação entre os dados teóricos e os experimentais.

Método

Foram selecionadas cinco salas de aula, localizadas dentro do Campus III – Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR). As salas de aula foram caracterizadas em função: a) da capacidade de ocupação; b) da geometria do ambiente (dimensões); c) dos materiais construtivos utilizados; d) dos materiais de recobrimento das paredes; e e) dos elementos adicionais componentes do meio físico das salas de aula (mesas, cadeiras, pranchetas, cortinas, entre outros).

Uma planilha de cálculo foi elaborada para o levantamento das dimensões dos ambientes e dos elementos componentes de seu meio físico. O reconhecimento dos materiais construtivos e das formas construtivas foi essencial para o trabalho de identificação dos coeficientes de absorção sonora junto à literatura corrente. Os dados tabelados foram utilizados no cálculo do tempo de reverberação, conforme a Equação de Sabine:

$$TR = \frac{0,163 \cdot V}{A} (s) \quad (1)$$

onde:

TR = tempo de reverberação do ambiente estudado em (s);

V = volume da sala em m^3 ; e

A = representa a área de absorção sonora equivalente devido aos elementos construtivos da sala (paredes, teto, piso e janelas), em m^2 (Tabela 1).

$A = A(f)$	Absorção equivalente da sala	m^2
$A_{PR} = A_{PR}(f)$	Absorção equivalente das paredes	m^2
$A_O = A_O(f)$	Absorção equivalente dos objetos	m^2
$A_{PES} = A_{PES}(f)$	Absorção equivalente referente às pessoas na sala	m^2
$A_L = A_L(f)$	Absorção equivalente do ar no ambiente	m^2
f	Frequência	Hz

Tabela 1 - Áreas de absorção sonora equivalente

A absorção sonora equivalente é dada pela expressão:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i, \text{ onde:} \quad (2)$$

α_i = coeficiente de absorção sonora de cada elemento construtivo:

S_i = a área do mesmo.

Na formulação proposta por Hohmann, Setzer e Wehling (2004), onde, além dos elementos construtivos da sala de aula, também são consideradas as áreas de absorção sonora dos elementos relativos à funcionalidade do ambiente (mesas, cadeiras, pranchetas, pessoas, etc.), bem como a atenuação sonora do ar, a atenuação sonora equivalente total é dada pela equação (2):

$$A = A_{PR} + A_O + A_{PES} + A_L (m^2) \quad (3)$$

A Tabela 1 apresenta a definição de cada elemento da equação (2).

Como as medições foram realizadas com as salas de aula vazias, a absorção equivalente devida à presença de pessoas no ambiente é $A_{PES} = A_{PES}(f) = 0$.

Para garantir a confiabilidade dos cálculos realizados, fez-se necessário identificar criteriosamente os coeficientes de absorção sonora dos elementos construtivos das salas de aula avaliadas e o coeficiente de absorção sonora das formas construtivas. Para tanto, vasta literatura foi consultada no intuito de se obter melhor aproximação possível dos elementos tabelados para com os elementos encontrados no ambiente real (CREMER; MÜLLER, 1978; KNUDSEN; HARRIS, 1988; CREMER; HUBERT, 1990; BERANEK; VÉR, 1992; HARRIS, 1994; BOBRAN; BOBRAN-WITFOHT, 1995; HECKL; MÜLLER, 1995; GÖSELE et al., 1997; LUTZ et al., 2002; HENN et al., 1999; GERGES, 2000; BARRON, 2003;

CRUZ DA COSTA, 2003; FASOLD; VERES, 2003; FUCHS, 2004, HOHMANN et al., 2004; MÖSER, 2004). A norma EN 12354-6 recomenda adotar os valores para o coeficiente de absorção sonora do ar m , para a temperatura de $t = 20^0 C$ e para a umidade relativa do ar de $\phi = 70\%$ (HOHAMNN et al., 2004). A Tabela 2 apresenta os valores do coeficiente de absorção do ar m para vários autores.

m PARA $t = 20^0 C$ E $\phi = 70\%$

Neste trabalho foram utilizados os valores para o coeficiente de absorção do ar contidos em Heckl e Müller (1995).

A Tabela 3 apresenta os coeficientes de absorção sonora para os materiais e para as formas construtivas identificados dentro das salas de aula analisadas.

Foi considerada uma área média de um (1) m^2 para as cadeiras e pranchetas.

As medições do tempo de reverberação foram realizadas obedecendo-se aos seguintes critérios: 1) salas de aula vazias; 2) portas e janelas fechadas; e 3) sem chuva.

Para a medição do tempo de reverberação *in situ*, foi utilizado: 1) o analisador em tempo real BK 2260; 2) fonte sonora dodecaédrica omnidirecional modelo BK 4296; e 3) amplificador de potência modelo BK 2716. Para o processamento dos dados foi utilizado o software Qualifier BK 7830.

Na determinação dos pontos de medição para o TR *in situ* observaram-se os procedimentos descritos pela norma ISO 3382 (ISO, 1997). Foram medidos cinco pontos por sala e três medições em cada um desses pontos. Portanto, o resultado por ponto é a média de três medições. O software de avaliação acústica Qualifier BK 7830 realizou a determinação do TR médio (média sobre os resultados dos cinco pontos avaliados) para as salas analisadas. As medições foram

realizadas no período da tarde entre 14h00 e 17h00, em época de recesso escolar para se evitar ao máximo a interferência do ruído externo. Deve-se lembrar que mesmo nesse período a movimentação de pessoas e veículos em torno da edificação onde estão as salas de aula foi uma fonte sonora intermitente. Ressalta-se o caso da

sala de aula PG-01, localizada junto a um estacionamento interno do *campus* e à via de circulação interna de ônibus urbanos. A sala de aula PG-07 também está junto ao estacionamento interno do *campus*. As salas de aula PG-04 e PG-06 situam-se no meio de prédio.

Coefficiente de absorção do som no ar $m [10^{-3} \text{ m}^{-1}]$	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Beranek-Vér (1992)	0,1	0,2	0,6	1,3	2,2	5,0
Heckl-Müller (1995)	0,1	0,2	0,53	0,79	1,42	3,81
Barron (2003)	0,1	0,2	0,35	0,85	2,08	5,33
Hohmann, Setzer e Wehling (2004)	0,1	0,3	0,6	1,0	1,7	4,1
Fasold-Veres (para $\phi = 50\%$)	-	0,075	0,25	0,75	2,5	7,5

Tabela 2 - Coeficiente de absorção sonora do ar m , para $t = 20^{\circ}C$ e $\phi = 70\%$.

Coefficiente Absorção Sonora α	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Parede tijolos rebocada caiada	0,018	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
Forro em fibra lenhosa, perfurado, espessura 20 mm, afastado da laje 300 mm	0,25	0,30	0,30	0,40	0,55	0,60
Janela simples fechada	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Porta madeira laqueada	0,2	0,15	0,10	0,10	0,09	0,11
Piso parquet madeira com junta seca	0,04	0,04	0,06	0,12	0,10	0,15
Madeira na parede, espessura 3 mm, com afastamento de 30 mm, preenchido com ar	0,15	0,25	0,12	0,08	0,08	0,08
Quadro negro de madeira, espessura 3 mm, afastamento da parede 100 mm	0,28	0,20	0,10	0,10	0,08	0,08
Quadro negro de alvenaria	0,018	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
Cadeira de madeira sem estofamento	0,02	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03
Prancheta de madeira	0,02	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabela 3 - Coeficientes de absorção sonora

Características do ambiente pesquisado

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizadas as salas de aula da Universidade Federal do Paraná (UFPR), construídas no ano de 1963, localizadas no Campus III, setor de Tecnologia, bloco IV.

A avaliação do tempo de reverberação foi realizada em cinco salas de aula de três modelos construtivos diferentes: (a) duas salas do modelo 1; (b) duas salas do modelo 2; e (c) uma sala do modelo 3. Cada modelo construtivo é assim descrito:

(a) modelo construtivo 1 (salas PG-01 e PG-07): piso de parquet de madeira; tijolos rebocados e caiados; teto com forro em fibra lenhosa perfurada, sendo parte desse rebaixado; janelas com esquadrias de ferro e fechamento em vidro comum; e porta em painel de madeira estruturado. O volume para este ambiente é de 367,2 m³;

(b) modelo construtivo 2 (PG-04 e PG-06): sala em forma de anfiteatro com piso de parquet de madeira; paredes em tijolos rebocados e caiados, com recobrimento de lambri de madeira de 1,20 m de altura; teto rebaixado com forro em fibra lenhosa perfurado; janelas com esquadrias de ferro com fechamento em vidro comum; e porta

em painel de madeira estruturado. O volume para este ambiente é de 294,7 m³; e

(c) modelo construtivo 3 (PG-15): piso de parquet de madeira; tijolos rebocados e caiados; teto com forro em fibra lenhosa perfurado, parte rebaixado horizontalmente e pé direito elevado e inclinado; janelas com esquadrias de ferro e fechamento em vidro comum; e porta em painel estruturado de madeira. O volume para este ambiente é de 372,3 m³.

Resultados e discussões

A primeira pergunta a ser feita e respondida é se a Equação de Sabine é aplicável aos modelos de ambientes (salas de aula) analisados. A condição para a aplicação da Equação de Sabine é o coeficiente médio de absorção sonora do ambiente ser de até $\bar{\alpha}_{ambiente} = 0,3$ (FASOLD; VERES, 2003). Essa condição é respeitada porque o coeficiente médio de absorção sonora dos ambientes estudados manteve-se abaixo de 0,3, conforme a Tabela 4. Para ambientes onde $\bar{\alpha}_{ambiente}$ é maior do que 0,3 recomenda-se, segundo Fasold e Veres (2003), o uso da Equação de Eyring. Gerges (2000) sugere o uso da Equação de Eyring ou de Millington e Sette (MILLINGTON, 1932; SETTE, 1933) para $\bar{\alpha}_{ambiente}$ maior do que 0,2. A Tabela 4 apresenta os coeficientes de absorção médios para os ambientes estudados em função da frequência.

Salas	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4kHz
Modelo Construtivo 1 PG-01	0,11	0,13	0,13	0,18	0,22	0,25
Modelo Construtivo 1 PG-07	0,11	0,13	0,13	0,18	0,22	0,25
Modelo Construtivo 2 PG-04	0,12	0,15	0,14	0,18	0,23	0,26
Modelo Construtivo 2 PG-06	0,12	0,15	0,14	0,18	0,23	0,26
Modelo Construtivo 3 PG-15	0,11	0,12	0,12	0,16	0,19	0,22

Tabela 4 - Coeficientes de absorção médios $\bar{\alpha}_{ambiente}$

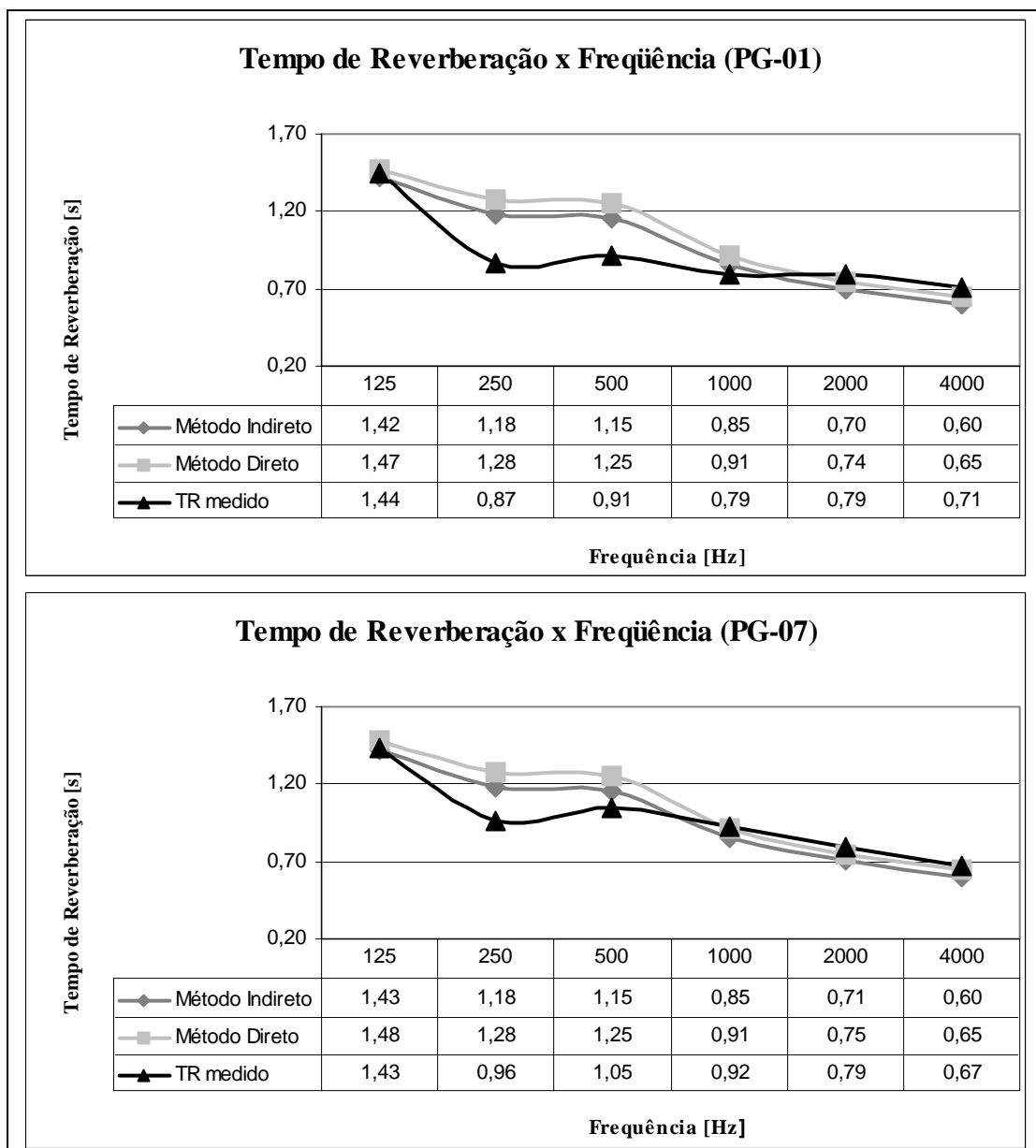


Figura 1 - Gráficos de tempo de reverberação em função da frequência para as salas de aula - modelo construtivo 1

Com o exposto acima é validada a aplicabilidade da Equação de Sabine (Método Direto) e da Equação de Sabine Modificada (Método Indireto).

A análise da Figura 1 mostra para a sala PG-01, modelo construtivo 1, os valores de TR calculados pelo Método Indireto mais próximos dos valores medidos para praticamente todas as frequências avaliadas, especialmente para 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz e 1 kHz. Nas frequências de 2 kHz e 4 kHz, existe praticamente uma sobreposição dos valores de TR obtidos pelos métodos teóricos e pelo método experimental. As curvas de TR para a sala PG-07, modelo construtivo 1, apresentam formato fortemente

similar às obtidas para a sala PG-01. Nota-se uma pequena variação nos valores medidos para as duas salas do mesmo modelo.

De forma geral, um número único é usado para expressar o tempo de reverberação. Esse valor é a média aritmética dos tempos de reverberação obtidos para as frequências de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz (FRANÇOIS; VALLET, 2001). Na sala PG-01, esse valor é 0,90 s para o Método Indireto; 0,97 s para o Método Direto e 0,83 s para o Método Experimental. Para a sala PG-07, tem-se o valor médio de TR pelo Método Indireto, 0,90 s, pelo Método Direto, 0,97 s e pelo Método Experimental, 0,92 s.

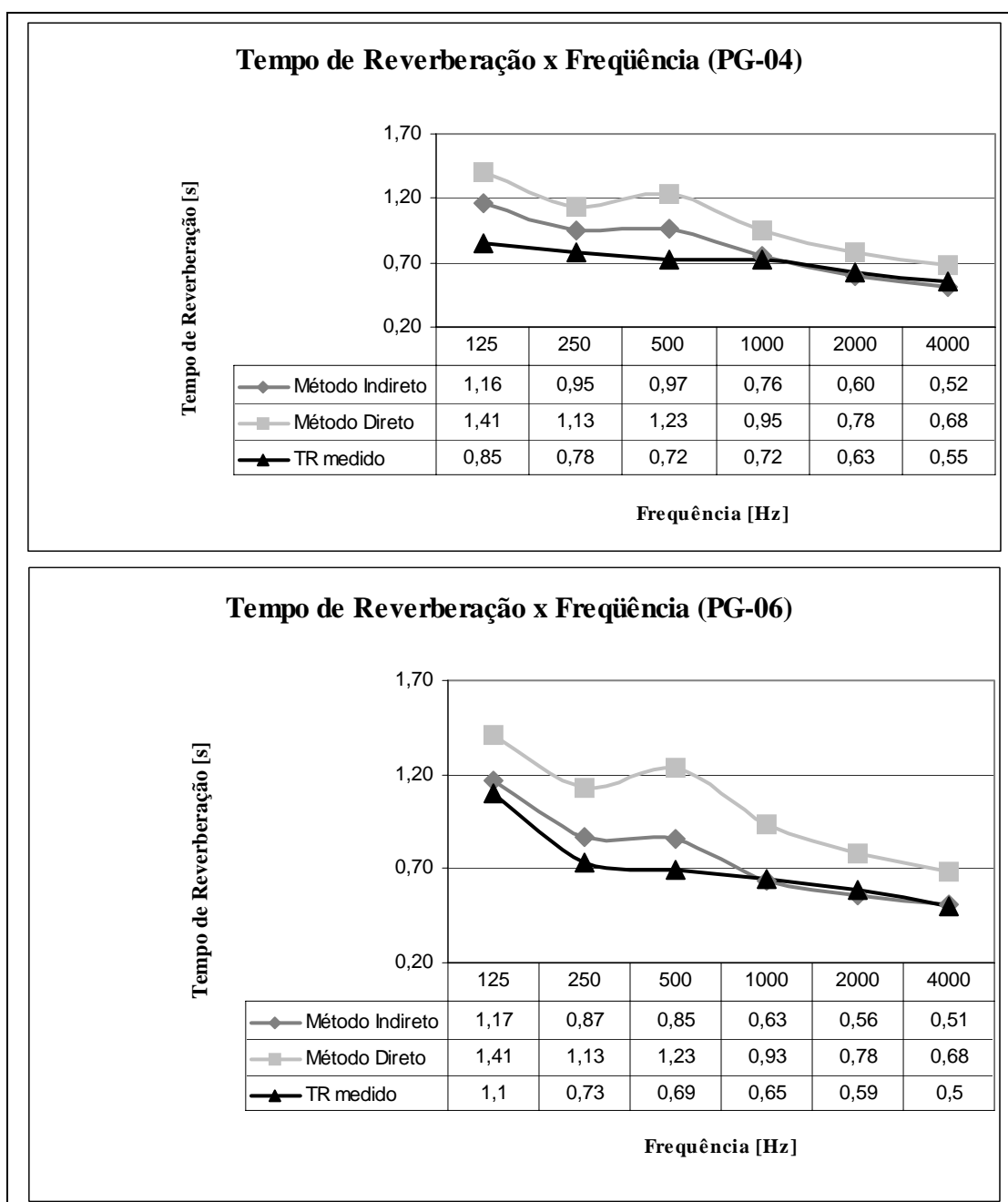


Figura 2 - Gráficos de tempo de reverberação em função da frequência para as salas de aula - modelo construtivo 2

A Figura 2, onde estão os resultados obtidos para as salas PG-04 e PG-06 do modelo construtivo 2, mostra que, para todas as frequências analisadas, existe concordância entre os dados obtidos pelo Método Indireto e pelo Método Experimental. Os valores obtidos pelo Método Direto são, em todas as frequências analisadas, maiores que os obtidos pelo Método Indireto e pelo Método Experimental.

De maneira geral, um número único é usado para expressar o tempo de reverberação. Esse valor é a média aritmética dos tempos de reverberação obtidos para as frequências de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz (FRANÇOIS; VALLET, 2001). Na sala PG-04, esse valor é 0,78 s para o Método Indireto, 0,99 para o Método Direto e 0,69 s para o Método Experimental. Na sala PG-06, o valor médio de TR pelo Método Indireto é 0,68 s; pelo Método Direto, 0,98 s e pelo Método Experimental, 0,64 s.

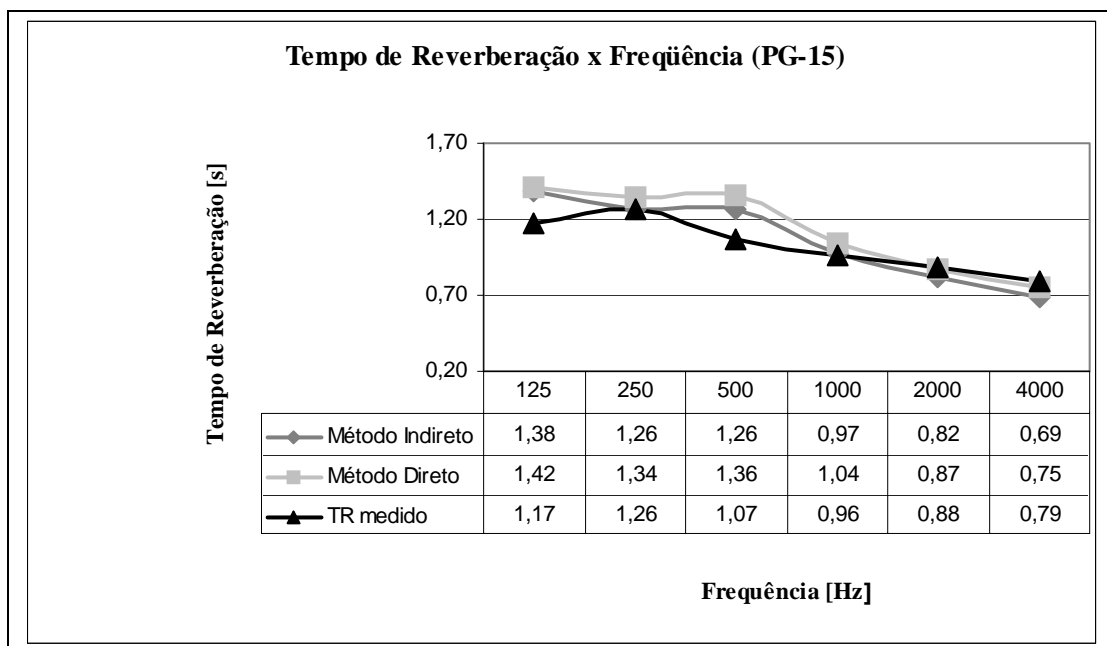


Figura 3 - Gráficos de tempo de reverberação em função da frequência para as salas de aula - modelo construtivo 3

Exemplo	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
$V = 1.000 \text{ m}^3$	-	0,3	1	3	10	30	100
$V = 10.000 \text{ m}^3$	-	3	10	30	100	300	1000

Tabela 5 - Área de absorção sonora equivalente $A_{AR} = 4.m.V \text{ [m}^2\text{]}$

Coefficiente de absorção do som no ar $m \text{ [} 10^{-3} \text{ m}^{-1}\text{]}$	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Heckl-Müller	0,1	0,2	0,53	0,79	1,42	3,81

Tabela 6 - Coeficiente de absorção utilizado na figura 4

A Figura 3 mostra haver boa concordância entre os dados obtidos experimentalmente e os obtidos numericamente pelo Método Indireto, para o modelo construtivo 3. De maneira abrangente, um número único é usado para expressar o tempo de reverberação. Esse valor é a média aritmética dos tempos de reverberação obtidos para as frequências de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz (FRANÇOIS; VALLET, 2001). Na sala PG-15, esse valor é 1,02 s para o Método Indireto; 1,09 s para o Método Direto e 0,97 s para o Método Experimental. Observa-se uma variação acentuada entre os valores teóricos e os experimentais na frequência de 125 Hz. Esse comportamento é decorrente da sensibilidade do equipamento de medição capaz de captar todos os sons do meio interno e externo, inclusive os sons provenientes da natureza no entorno da

edificação, que são, predominantemente, de baixa frequência (HUNT, 1992).

A fim de verificar-se a influência ou não do cômputo da absorção do ar nos resultados teóricos obtidos, colocou-se para o coeficiente de absorção do ar o valor zero, $m = 0$. As Figuras 4 e 5 mostram os resultados obtidos para a sala PG-04, modelo construtivo 2, com e sem a influência do coeficiente de absorção do ar no cálculo teórico. Percebe-se claramente não existir influência da absorção sonora do ar para o modelo construtivo em análise, cujo volume é de $294,7 \text{ m}^3$. Essa observação está de acordo com o exposto por Fasold e Veres (2003). Os autores afirmam que a influência da absorção do ar é significativa para a propagação em campo aberto, para grandes volumes e especialmente em altas frequências.

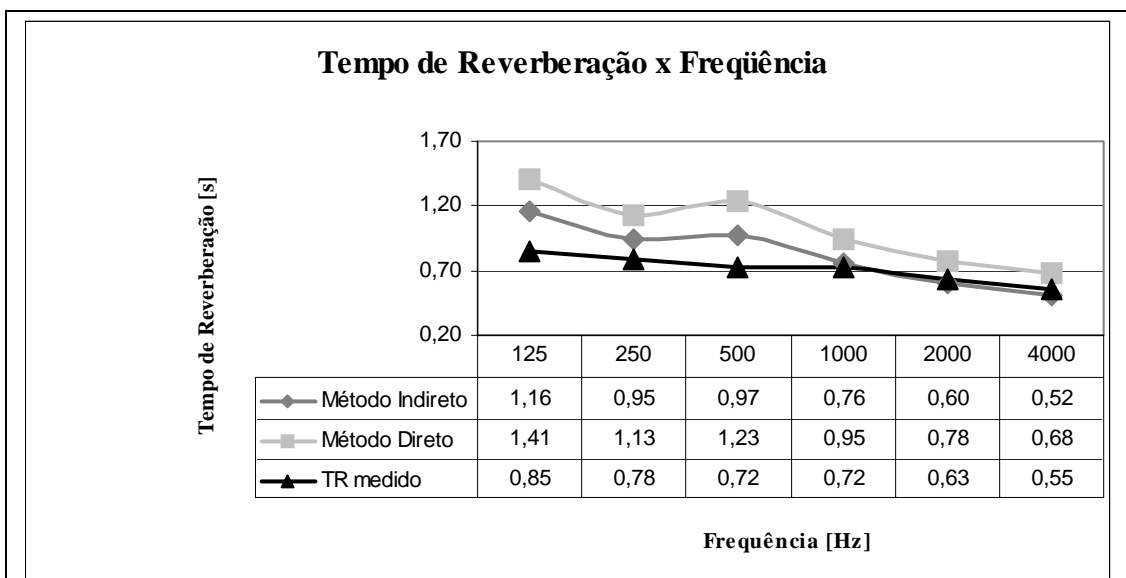


Figura 4 - Gráficos de tempo de reverberação versus frequência para a sala de aula pg-04, modelo construtivo 2, considerando-se a absorção sonora através do ar

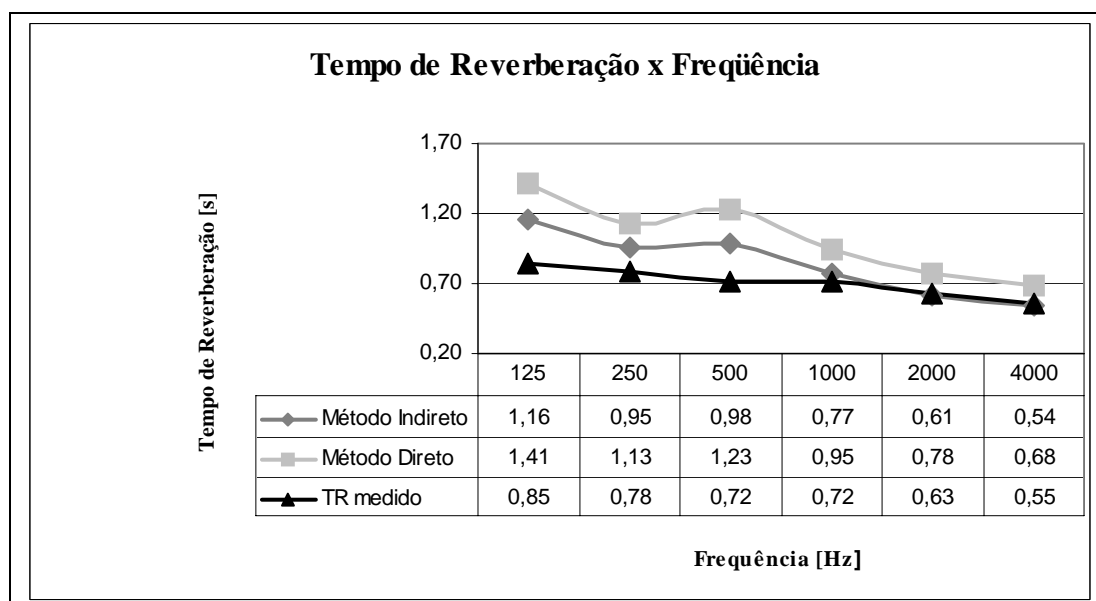


Figura 5 - Gráficos de tempo de reverberação versus frequência para a sala de aula pg-04, modelo construtivo 2, considerando $m = 0$

O exposto fica evidente na Tabela 5 (FASOLD; VERES, 2003), onde a absorção sonora equivalente devida ao ar é calculada em função de grandes volumes. Os valores de m são os apresentados na Tabela 2 para Fasold e Veres (2003).

Conclusões

O presente trabalho avaliou, pelos métodos teórico e experimental, os tempos de reverberação de salas de aula.

Os métodos teóricos utilizados foram a Equação de Sabine, chamada neste trabalho de Método Direto, e a Equação de Sabine Modificada, chamada de Método Indireto, segundo a formulação de Hohmann et al. (2004). Nessa formulação são considerados no cômputo da área de absorção sonora equivalente às contribuições do ar e dos elementos necessários ao uso do ambiente, neste caso salas aula, mesas, cadeiras, pranchetas e quadro negro.

Os resultados mostraram ser possível negligenciar a influência da absorção sonora

devida ao ar para volumes da ordem dos aqui avaliados, ou seja, aproximadamente 400 m³. A influência da absorção do ar se faz perceber para grandes volumes, iguais ou acima de 1.000 m³, especialmente em altas frequências (FASOLD; VERES, 2003).

Os resultados mostraram que os valores de tempos de reverberação fornecidos pela Equação de Sabine Modificada (Método Indireto), na maioria dos casos, mais similares aos obtidos pelo método experimental.

Deve-se ressaltar a importância do uso de coeficientes de absorção “calibrados” na Equação de Sabine Modificada (Método Indireto), ou seja, eles devem ser tomados preferencialmente de medições avalizadas por institutos de conhecida competência e seriedade, ou então retirados da literatura corrente, na qual também possa ser conferido o caráter de renomado e sério. O presente trabalho apresentou atualíssima literatura, nacional e internacional, de diversos autores consagrados, cuja qualidade dos dados apresentados garante a precisão dos coeficientes de absorção sonora.

Neubauer (2001) destaca que o uso de coeficientes de absorção retirados de tabelas padrão fornece, em geral, tempos de reverberação muito maiores do que os obtidos experimentalmente. Kuttruff (1979) evidencia as diferenças entre os tempos de reverberação obtidos pelos métodos teóricos e aqueles obtidos experimentalmente, como consequência do fato de não ser possível considerar todas as prováveis causas de absorção sonora no ambiente avaliado.

Devem-se destacar também as condições gerais do ambiente medido (salas de aula), construído no fim da década de 60 e início da de 70. Muitas janelas não têm vedação adequada e não é possível fechá-las por completo. O forro de fibra lenhosa perfurado e afastado da laje superior em concreto foi encontrado em alguns casos destruído. Esses forros nem sempre são substituídos e, quando o são, muitas vezes por alteração no padrão, podem não ser mais perfurados. As portas têm grandes frestas e, em alguns casos, não foi possível fechá-las totalmente.

Os resultados aqui apresentados contradizem Millington (1932). Este estudioso afirma ser a Equação de Sabine a mais adequada no cálculo do tempo de reverberação. Com base nos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que a Equação de Sabine Modificada (Método Indireto) é a mais indicada, pois fornece valores próximos aos obtidos experimentalmente.

Referências bibliográficas

BARRON, R. F. **Industrial noise control and acoustics**. New York: Marcel Dekker, 2003.

BERANEK, L. L.; VÉR, I. L. **Noise and vibration control engineering: principles and applications**. 4. ed. New York: Wiley Interscience Publications, 1992. 823 p.

BISTAFA, S.; BRADLEY, J. Reverberation time and maximum background-noise level for classroom from a comparative study of speech intelligibility metrics. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 107, n. 2, p. 861-875, 2000.

BOBRAN, H. W.; BOBRAN-WITTFOHT, I. **Handbuch der Bauphysik**. 7. Völlig Neubearbeitete Auflage, 1995.

BRADLEY, J. **Optimizing sound quality for classrooms**. In: ENCONTRO DA SOBRAC, 20., SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METROLOGIA EM ACÚSTICA E VIBRAÇÕES – SIBRAMA, 2., Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2002.

CREMER, L.; HUBERT, M. **Vorlesungen über Technische Akustik**. Vierte Auflage mit 177 Abbildungen. Springer-Verlag, 1990.

CREMER, L.; MÜLLER, H. A. **Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik**. 2. Völlig Neubearbeitete Auflage. S. Hirzel Verlag Stuttgart, 1978.

CRUZ DA COSTA, E. **Acústica técnica**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

EUROPEN NORM – EN. **EN 12354-6 Building Acoustics: estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements**. Part 6: Sound absorption in enclosed spaces. UK, 2000.

FASOLD, W.; VERES, E. **Schallschutz und Raumakustik in der Praxis**. Planungsbeispiele und Konstruktive Lösungen. Huss-Medien GmbH, Verlag Bauwesen, Berlin, 2003.

FRANÇOIS, D.; VALLET, M. **Noise in schools**. World Health Organization Regional Office for Europe, 2001.

FUCHS, H. V. **Schallabsorber und Schalldämpfer**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. New York, 2004.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: fundamentos e controle**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

- GÖSELE, K.; SCHÜLE, W.; KÜNZEL, H. **Schall – Wärme – Feuchte**. Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau. 10., Völlig Neubearbeitete Auflage. Bauverlag – Wiesbaden und Berlin, 1997.
- HAGEN, M.; HUBER, L.; KAHLERT, J. Acoustic school design. In: FORUM ACUSTICUM SEVILHA. **Proceedings...** Sevilha, 2002. p. 1-7.
- HARRIS, C. M. **Noise control in building**. New York: MacGraw-Hill, 1994.
- HECKL, M.; MÜLLER, H. A. **Technischen Akustik**. 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. New York, 1995.
- HENN, H.; SINAMBARI, G. R.; FALLEN, M. **Ingenieur – akustik**. 2., Erweiterte und Überarbeitete Auflage. Vieweg, 1999.
- HODGSON, M. Case-study evaluations of the acoustical designs of renovated university classrooms. **Applied Acoustics**, v. 65, p. 69-89, 2003.
- HOHMANN, R.; SETZER, M. J.; WEHLING, M. **Bauphysikalische Formeln und Tabellen**. 4. ed. Werner Verlag, 2004.
- HUNT, F. V. **Origins in acoustics**. 2. ed. New York: Acoustical Society of America, 1992. 212 p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Acoustics**: measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters. ISO 3382, 1997.
- KNUDSEN, V. O.; HARRIS, C. M. **Acoustical designing in architecture**. Acoustical Society of America, 1988.
- KUTTRUFF, H. **Room acoustics**. 2. ed. London: Applied Science Publishers, 1979.
- LUBMAN, D.; SUTHERLAND, L. C. Good classroom acoustics in a good investment. **Classroom Acoustics**, p. 1-2, 2003.
- LUTZ; JENISCH; KLOPFER; FREYMUTH; KRAMPF; PETZOLD. **Lehrbuch der Bauphysic**. Stuttgart B. G. Teubner GmbH, 2002.
- MILLINGTON, J. G. A modified formula for reverberation. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 4, n. 1, p. 69-82, 1932.
- MÖSER, M. **Engineering acoustics**. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- NEUBAUER, R. Classroom acoustics: do existing reverberation time formulae provide reliable values? In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, 17., Rome. **Proceedings...** Rome, 2001.
- SETTE, W. J. A new reverberation time formula. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 4, p. 193-210, 1933.
- SILVA, D. T. da. **Estudo da isolação sonora em paredes e divisórias de diversas naturezas**. Originalmente apresentado como Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2000.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO (UK). **Noise and health**. 2000.
- ZANNIN, P. H. T.; PAZ, E. C.; LORO, C. P. **Acoustical quality of educational buildings**: the acoustic of modular classrooms. Submetido a Applied Ergonomics em 2004.